

黄河流域水环境问题研究现状、挑战与展望

李文婧¹, 周凌峰¹, 赵晓丽^{1*}, 吴小伟¹, 刘玲玲¹, 刘文丰², 吴丰昌¹

1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083

摘要: 黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大发展战略, 保护黄河是事关中华民族伟大复兴和永续发展的千秋大计。近年来, 黄河流域水环境质量明显改善, 但有限的水资源和脆弱的生态系统使得黄河流域水环境保护仍面临巨大的挑战。科学诊断黄河流域重大水环境问题是新时期治理黄河的前提和关键。本文围绕黄河流域水环境问题诊断这一主题, 聚焦黄河流域断面水质改善的核心需求, 首先分析黄河流域水环境现状, 发现黄河流域整体水质持续向好, 但干支流水质改善不同步, 流域主要污染指标时空差异显著, 中下游和部分支流污染严重; 其次梳理国内外相关研究进展和主要挑战, 总结断面水质提升所需的核心理论与技术, 如水环境承载力评价、污染排放清单构建与水环境模型模拟等方面的应用与发展趋势, 发现黄河流域存在气候变化影响下水沙变化大、现有排放清单分辨率不足、水环境模拟缺乏多尺度污染排放—断面水质响应关系研究等问题, 难以支撑未来精细化水环境管理。对黄河流域水环境研究的未来发展进行了展望, 建议未来在以下几个方面开展进一步研究, 包括气候变化下黄河流域水环境承载力研究、黄河流域高分辨率排放清单构建、多尺度污染排放与断面水质响应关系。

关键词: 黄河流域; 水质时空分析; 水环境承载力; 污染排放清单; 水环境模型

中图分类号: X24

文章编号: 1001-6929(2024)01-0032-10

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.12.05

Current Status and Challenges in Diagnostic Research on Water Environment Problems in the Yellow River Basin

LI Wenjing¹, ZHOU Lingfeng¹, ZHAO Xiaoli^{1*}, WU Xiaowei¹, LIU Lingling¹, LIU Wenfeng², WU Fengchang¹

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract: Ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin (YRB) is an important national development strategy. The protection of the YRB is a project related to the great rejuvenation and sustainable development of the Chinese nation. The water quality in the YRB has improved significantly in recent years. However, due to limited water resources and fragile ecosystems, the protection of the YRB still faces great challenges. The premise and key to controlling the Yellow River in the new era is to scientifically diagnose major water environment issues in the YRB. To this end, this review focuses on the primary needs for water quality improvement in the YRB and analyzes the present situation of water environment in the YRB. While the YRB's overall water quality is continuously improving, but the water quality improvement of the mainstream and tributaries is not synchronized. The spatial and temporal differences of the main pollution indicators in the basin are significant, and the pollution in the middle and lower reaches and some tributaries is serious. Additionally, relevant research progress and main challenges for water quality improvement in the YRB are covered, including water environment carrying capacity assessment, pollution emission inventory construction, and water environment simulation models. The study found that there are problems in the Yellow River Basin, such as the large changes in water and sediment under the influence of climate change, the insufficient resolution of the existing emission inventories, and the lack of multi-scale pollution emission-section water

收稿日期: 2023-07-10 修订日期: 2023-11-16

作者简介: 李文婧(1999-), 女, 甘肃金昌人, liwenjing3317@163.com.

* 责任作者, 赵晓丽(1981-), 女, 河北邢台人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事水质基准理论与方法学和纳米材料研究, zhaoxiaoli_zxl@126.com

基金项目: 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究项目 (No.2022-YRUC-01-0201); 国家自然科学基金项目 (No.42107425)

Supported by Joint Research Program for Ecological Conservation and High-Quality Development of the Yellow River Basin, China (No.2022-YRUC-01-0201); National Natural Science Foundation of China (No.42107425)

quality response relationship in water environment simulation, which are difficult to support the refined water environment management in the future. It is suggested that further research should be carried out in the following aspects, including research on the water environment carrying capacity of the Yellow River Basin under climate change, construction of a high-resolution emission inventory of the Yellow River Basin, response relationship between multi-scale pollution emission and cross-section water quality, and the future development of water environment research in the Yellow River Basin is prospected.

Keywords: Yellow River Basin; spatio-temporal analysis of water quality; water environment carrying capacity; emission inventory; water environment simulation models

黄河是中华民族的母亲河,发源于青藏高原,流经青海省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、山西省、陕西省、河南省及山东省 9 个省区(见图 1),全长 5 465 km,流域总面积 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,是连接西北高原与东部渤海的重要生态廊道,更是横跨东、中、西部的重要经济区和能源基地,在我国经济社会发展和生态安全方面具有重要的地位,对维护国家和区域安全具有不可替代的重要作用^[1-2]。党的十八大以来,黄河流域水环境持续向好,总体水质明显改善,主要污染物浓度呈下降趋势。但黄河流域水污染呈现复合型和结构型特点,仍存在产业转型升级滞后以及水污染治理和环境风险防范工作不到位等问题^[3],流域内有限的水资源和脆弱的生态系统也将长期对流域水环境保护和绿色可持续发展构成威胁。当前,“黄河流域生态保护和高质量发展”已被列为国家重大战略^[4]。2019 年 9 月,在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上,习近平总书记提出“治理黄

河,重在保护,要在治理”^[5]。中华人民共和国第十三届全国人民代表大会常务委员第三十七次会议通过的《中华人民共和国黄河保护法》于 2023 年 4 月 1 日起施行,为黄河流域的水安全提供了有力的法律保障,也为黄河流域生态保护和高质量发展奠定了坚实的基础^[6]。

受人类活动和气候变化等因素的影响,黄河流域水环境问题成因复杂且本底不清,识别与诊断技术方法缺乏,导致治理管控缺少抓手、科学依据不足,水环境问题的精准识别诊断仍面临巨大挑战。因此,科学诊断黄河流域重大水环境问题是新时期治理黄河的前提和关键。该研究围绕黄河流域水环境问题诊断这一科学问题,聚焦黄河流域断面水质改善的核心需求,分析黄河流域水环境现状,总结国内外关于黄河流域水环境问题诊断的进展、问题与挑战,并针对黄河流域水环境研究的未来发展进行展望。



图 1 黄河流域与水质监测站点

Fig.1 Yellow River Basin and water quality monitoring section

1 黄河流域水质现状

在黄河流域水质评价和时空变化趋势研究方面,

我国学者已经开展大量研究。陈静生等^[7]对黄河流域 1960—1994 年的水质资料进行分析研究,发现黄

河流域各主要离子和离子总量均有缓慢增长趋势。孔祥春等^[8]采用单项参数分类和地图叠加法对黄河干支流水质进行综合评价,结果表明黄河干流及主要支流重点河段全年均污染严重。孙占超等^[9]基于云模型和熵权法理论,对黄河干流宁夏段进行水质现状综合评价,客观反映了宁夏境内黄河干流的水环境状况。杨学福等^[10]采用多种分析方法对 2012 年渭河西安—咸阳段水体的污染特征进行综合评价,发现水体主要以有机污染和富营养化污染为主。朱志鹏等^[11]系统分析了 2015—2019 年黄河干流 8 个站点的水质时空分布和趋势变化特征,确定黄河干流主要污染指标为氨氮和总磷。王希欢等^[12]开展乌梁素海流域农业排干和湖体硝酸盐分析,应用 IsoSource 同位素模型估算流域生产生活污水、土壤氮源、化肥和大气沉降的贡献率,发现春季应着重加强农业面源污染控制,夏季和秋季应强化城乡生活污水处理。郝晨林等^[13]采集黄河流域(青海段)30 个断面不同时期的水样进行监测,分析氮时空分布特征,并采用氮氧稳定同位素技术解析了水体中氮的主要来源,发现黄河流域(青海段)氮污染主要集中在湟水河流域,主要来源为土壤源、凋落物源和城镇点源。

近年来,黄河流域水质评价研究缺乏对黄河全流域的水质评价,因此笔者收集了来自中国环境监测总站对黄河流域地表水国考断面(点位)进行监测并发布的《全国地表水水质月报》(2018—2022 年)以及黄河流域国控断面近 120 个自动监测站点的水质监测数据(2020 年 12 月—2021 年 11 月),对 2018—2022 年黄河全流域水质总体状况和时空差异进行评价。全国地表水水质月报中 COD 代表 COD_{Cr} ,高锰酸盐指数代表 COD_{Mn} ,总氮数据未计入地表水质月报。

1.1 流域总体水质好转,干支流水质改善不同步

“十三五”和“十四五”期间国家地表水环境质量监测网在黄河流域设置多个国考断面(点位),并根据监测结果编制《全国地表水水质月报》,水质评价标准执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),按 I 类~劣 V 类六个类别进行评价。根据 2018—2022 年 5 年共 60 期全国地表水水质月报,统计了黄河流域的基本水质情况。

由图 2 可见,2018—2022 年黄河流域地表水总体水质状况逐渐向好,总体水质状况从轻度污染提升到良好状态,I~III 类水占比由 69.4% 升至 85.1%,V 类和劣 V 类水占比由 15.8% 降至 5.22%。干流在 2020

年彻底消除 V 类和劣 V 类水体,截至 2022 年,优于 III 类水体的断面占 86.6%。但在干流水质得到改善的同时,中游部分支流水污染形势依然严峻,截至 2022 年,支流水质为 III 类以下的监测断面仍占 6.3%,部分支流近年来水质持续为劣 V 类,水环境状况仍不容乐观。

1.2 主要污染指标总体呈下降趋势,季节性差异明显

基于《全国地表水水质月报》黄河流域监测断面主要污染物近 5 年(2018 年 1 月—2022 年 12 月)月均浓度超标数据,识别黄河流域主要污染指标和超标情况(见图 3)。由图 3 可见:化学需氧量(COD)、氨氮、总磷、五日生化需氧量(BOD)、高锰酸盐指数超标断面占比超过 5%,超标率较高,需要重点关注;氟化物、石油类和溶解氧等超标断面占比在 1%~5% 之间;砷、汞、硫化物、酸碱度(pH)等指标超标断面占比低于 1%,超标率较小。

该研究根据 2018—2022 年黄河流域主要污染指标的月均超标率,识别各污染指标的时间变化趋势。由图 4 可见,污染指标超标率总体呈下降趋势,氨氮、氟化物等在冬季污染较为严重,夏季污染较轻。夏季氨氮浓度低可能是由于夏季水温较高,微生物活性增强,硝化反应速率升高^[14-15],因此氨氮浓度降低;枯水期水量较小、颗粒物含量较低和微生物活性降低等因素导致氨氮污染加重^[16]。相反,COD、高锰酸盐指数和溶解氧的超标率则呈夏季高、冬季低的趋势。黄河流域 COD 主要来自农业源排放,占比高达 62.81%^[4],夏季降水量大,面源污染负荷强,导致黄河有机污染负荷增加^[17]。溶解氧浓度呈现出较大的季节性差异,水温是影响水体中溶解氧浓度的主要因素,温度越高水体中的氧气越容易饱和^[18],夏季汛期气温高,水体溶解氧浓度较低,从而导致水体溶解氧超标率高。

1.3 水质空间差异大,中下游地区和部分支流污染严重

根据《全国地表水水质月报》数据统计黄河流域整体污染超标情况,为进一步探究黄河水质的空间差异,基于黄河流域国控断面 2020 年 12 月—2021 年 11 月近 120 个自动监测站点的水质监测数据,对 4 种主要污染物(高锰酸盐指数、总磷、氨氮和总氮)的断面超标情况及空间分布进行分析(见图 5)。高锰酸盐指数超标率较高的站点主要位于榆林市、吕梁市、运城市和西安市,总磷超标率较高的站点主要分

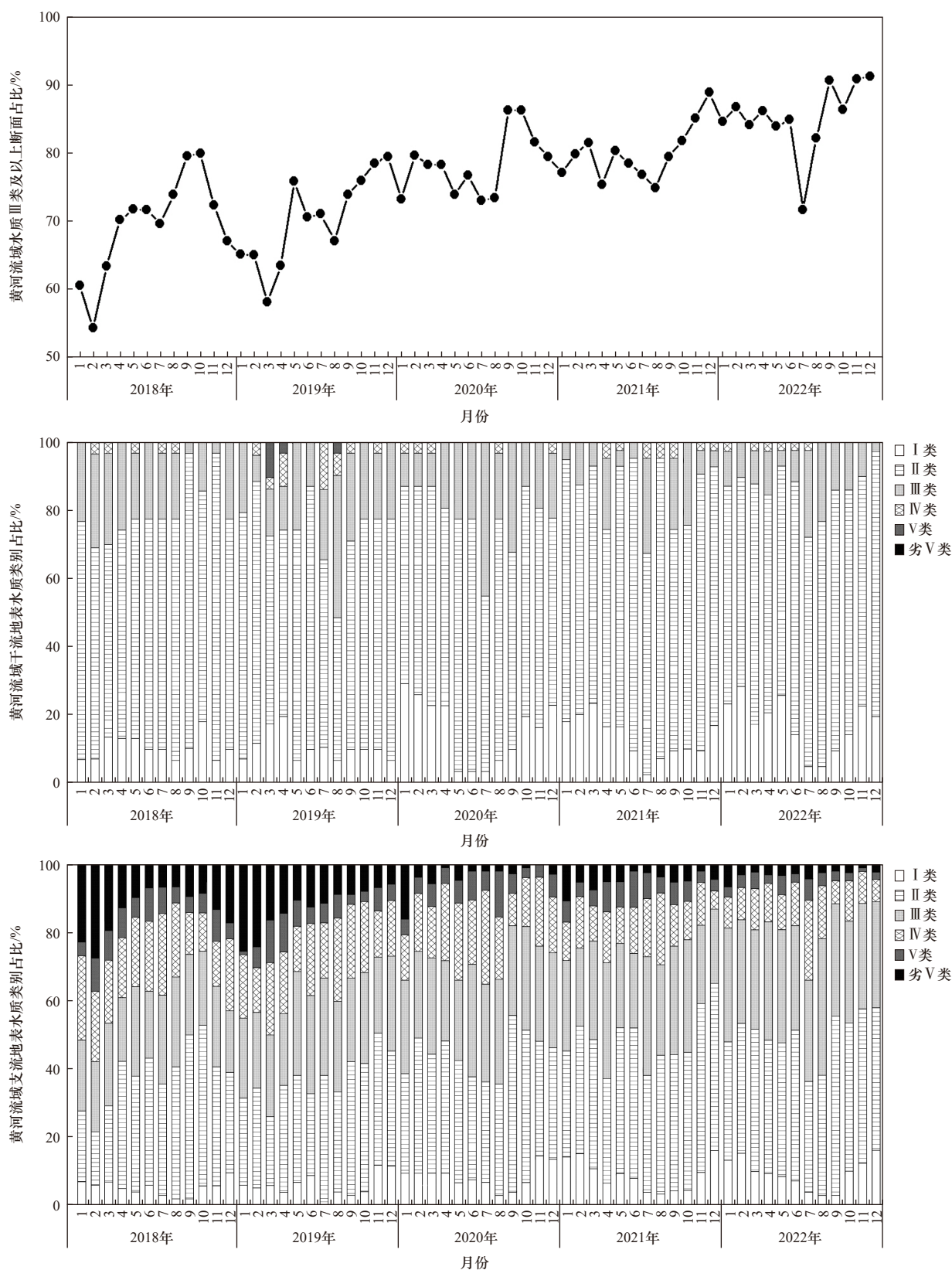


图 2 黄河流域断面地表水质类别占比

Fig.2 The proportion of surface water quality categories in the Yellow River Basin section

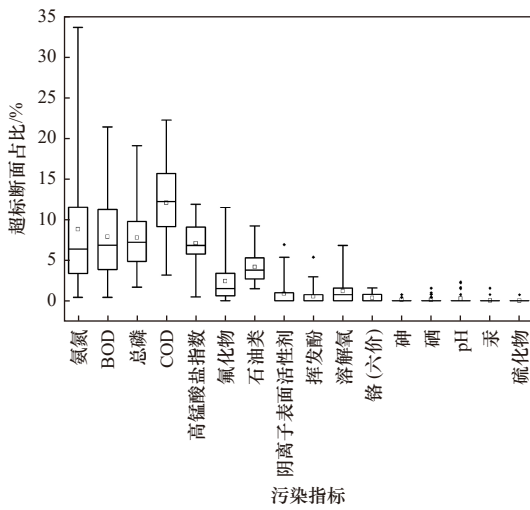


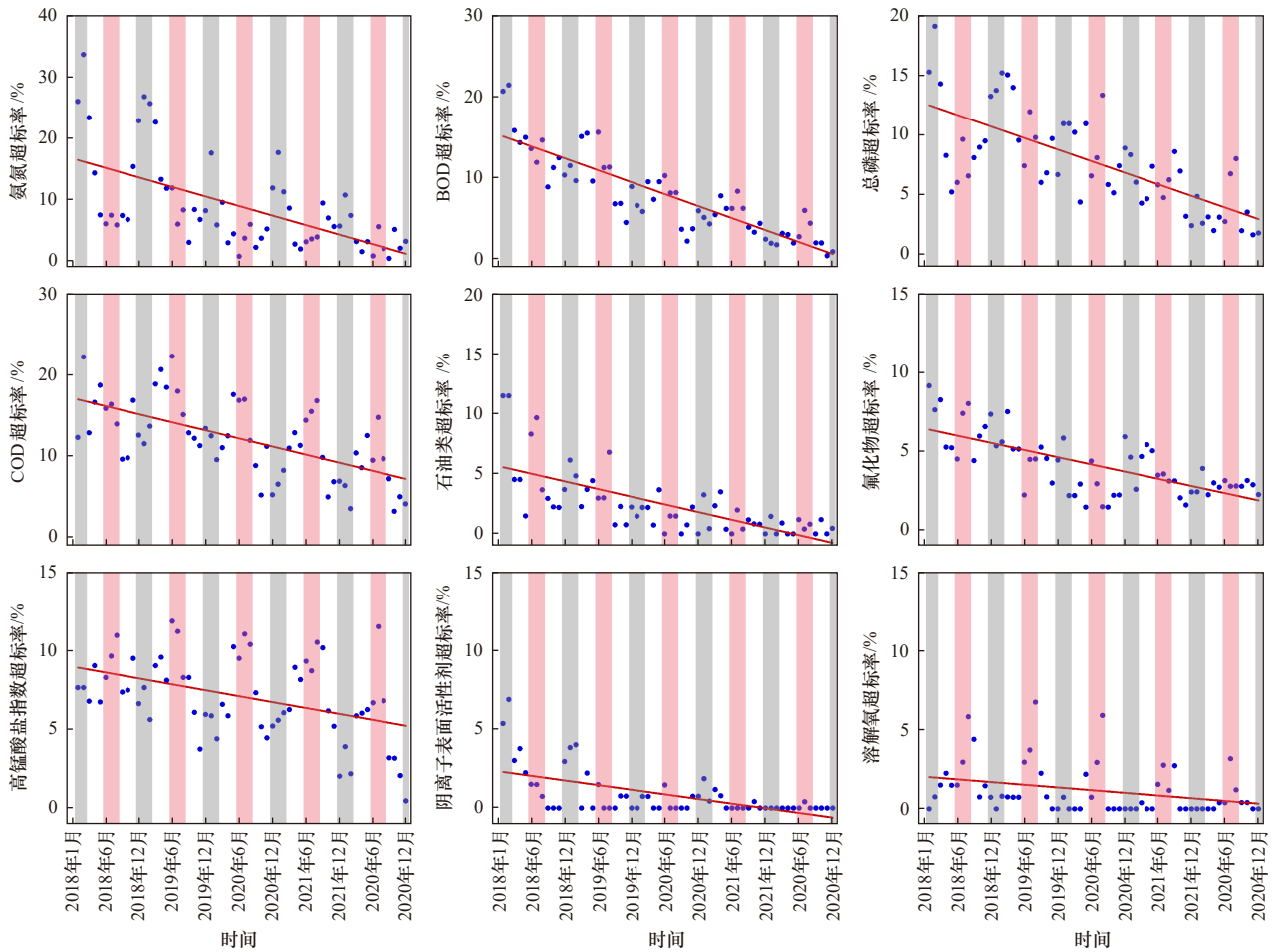
图 3 黄河流域主要污染指标超标断面占比

Fig.3 Proportion of main pollution indexes exceeding the standard section in the Yellow River Basin

布在榆林市、晋中市、西安市和铜川市,氨氮在晋中市、榆林市和运城市存在部分站点严重超标情况.黄

河流域总氮不纳入水质月报统计数据,因此前文未作为主要污染物进行识别.但根据站点监测数据来看,总氮在多数站点均严重超标,黄河流域总氮污染问题严重.

渭河是黄河最大的支流,接纳关中地区(陕西省中部)各级支流和沿岸排放的污染物,流域内造纸、化工、电子设备等重污染企业较多,加之沿岸城镇扩张速度加快,汇水区人口密集大,大量废水废渣和生活污水未经有效处理直接排入河流^[10].咸阳市、西安市和渭南市境内大量排放生活污水和农业面源污染物导致地表氨氮浓度升高^[19-21].山西省内污染排放主要来源于化工、煤炭采选和焦化冶金等行业,省内断面常年水质较差^[22].汾河作为山西省重要的能源化工基地,干流区域经济发达,人口密度大,煤炭、冶金和焦化业发达,导致工业废水和生活污水排放造成的高锰酸盐指数超标程度较高.汾河下游氨氮的超标可能主要受到农田地



注:红色区域代表夏季(6月、7月、8月),灰色区域代表冬季(12月、1月、2月).红色线为趋势线.

图 4 黄河流域主要污染指标超标率时间趋势

Fig.4 Time trend of over-standard rate of main pollution indexes in the Yellow River Basin

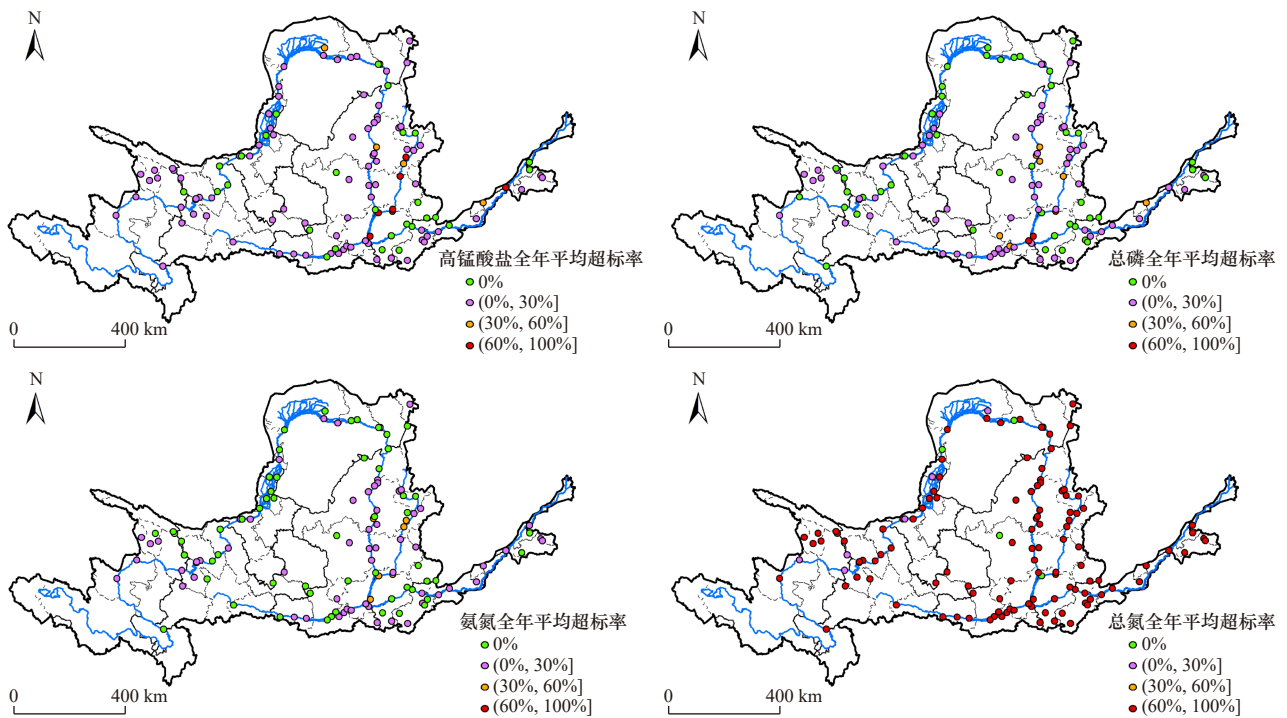


图5 黄河流域主要污染物监测断面分布及超标率

Fig.5 The distribution of main pollutant monitoring sections and the over-standard rate in the Yellow River Basin

表径流、畜禽养殖的影响^[23],部分区域的高值可能来源于工业废水的污染^[24],加上夏季降雨径流冲刷,导致断面监测氨氮超标严重。

2 黄河流域水环境问题诊断研究进展与挑战

针对黄河流域水质现状及存在问题,围绕断面水质达标/提升的核心需求,对黄河流域水环境承载力评价、水污染排放清单构建与水环境模型模拟这3个方向的研究进展和挑战进行综述。需要注意的是,该研究主要关注水质诊断和成因分析,断面水质达标/提升涉及的其他技术方法,如排放总量分配与削减等技术方法不在该文讨论之列。

2.1 黄河流域水环境承载力研究

水环境承载力是指在一定的水域,其水体能够被继续使用并仍保持良好生态系统功能时,所能够容纳污水及污染物的最大能力^[25],是衡量一个地区社会发展状况、经济建设水平、生态环境健康水平的重要指标^[26-27]。流域水环境承载力受到可利用水资源量、水体纳污能力和区域气候变化等众多因素的影响,是否超载对应于排入水体的污染物是否超过水环境容量以及水环境质量是否达到人为设立的水质目标^[28]。运用科学系统的评价方法衡量黄河流域水环境承载力状态,可为流域/区域水环境管理、断面水质达标/提升方案的制定提供科学依据。

蒋晓辉等^[29]建立了区域水环境承载力的大系统

分解协调模型,将模型应用于关中地区,得到不同方案下关中地区水环境承载力及提高关中水环境承载力的最优策略。钱华^[30]建立了水环境承载力的指标体系和评价模型,并以黄河万家寨水库及其上游为例进行了评价和分析,提出了提高水环境承载力的措施和建议。陈艳霞^[31]采用区域水环境承载力评价模型(RAG-PPE),开展了渭河流域关中地区水环境承载力的综合评价,发现维持现有用水水平下,水环境承载力将呈逐年下降趋势。贾紫牧等^[32]以湟水河流域小峡桥监测断面上游为例,针对不同分区特点提出具有针对性的水环境承载力调控措施。梁天祚^[27]在伊洛河流域构建了水环境承载力评价模型,计算了伊洛河流域2009—2018年水环境承载力,并预测不同情境下流域水环境承载力状况。张扬等^[33]以青海省湟水流域为例,构建了气候变化影响下的流域水环境承载力评估方法体系,发现未来气候变化情景下湟水流域水环境承载力总体呈现改善的趋势。

干支流水质水量差异显著,气候变化影响下水沙变化大,亟需开展气候变化下的流域水环境承载力动态研究。未来气候变化将通过改变流域水文循环和污染物输移等过程对水资源承载力和水环境容量产生重大影响,黄河流域干支流水质水量差异显著,同时也是世界上含沙量最高、输沙量最大的河流。未来进行黄河流域水环境承载力评价时,需要先调查与评估

水环境现状,在原有计算方法的基础上综合考虑流域水质、水量和含沙量等因素,进一步开展气候变化影响下水环境承载力的动态变化评估与分析研究,揭示黄河流域气候变化对流域水环境承载力的影响,才能满足黄河流域水环境管理的重要需求。

2.2 黄河流域水污染源排放清单研究

水污染源清单是指在特定地理区域、特定时间间隔内,各类污染源排入水体的各种污染物的种类和数量的综合清单^[34],在一定程度上能反映出污染物从源头产生、排放直到入河的过程,是研究水污染成因、限制污染物排放的重要依据之一。排放清单的编制将污染源大体上分为点源和面源,点源包括规模化畜禽养殖、工业企业污水和集中式污水处理设施,面源包括城镇和农村生活废水、农业种植、畜禽散养和城市径流。

殷炳超等^[35]在湟水流域构建了包括点源和面源的全口径水环境污染污染物排放清单,并在此基础上分析了污染物排放的空间分布与热点区域。翟元晓等^[36]通过排放因子法对黄河流域 2000 年、2005 年、2010 年农业生产活性氮排放量进行核算,得出各省份排入水体的活性氮排放量以及变化趋势,河南省和山西省排放量持续较高,各省份水体活性氮排放量总体呈不同程度的下降趋势。陶园等^[37]分析了黄河流域污染物排放总量以及流域内各省份农业面源污染排放量,探究了影响农业源污染化肥施用量、秸秆产生量和畜禽养殖等因素的时空分布情况,发现污染量输出最大的省份为内蒙古自治区,畜禽养殖是化学需氧量排放量最直接的影响因素,化肥是氨氮、总氮及总磷排放量最直接的影响因素。李雪迎等^[38]构建了水污染物空间分类模型,引入污染综合评价指数,揭示黄河流域甘肃段工业废水污染的空间排放特征。白璐等^[4]分别从污染源的活动水平、污染物产生、污染物去除和污染物排放 4 个方面选取了 28 个指标,对黄河流域 60 个市州主要水污染物排放特征开展了现状评价和聚类分析,发现黄河流域中下游城市污染排放强度相对较大且分布集中,化学需氧量和总磷排放主要来自农业源,氨氮排放主要来自生活源,总氮排放来自农业源和生活源。

现有排放清单分辨率不足,难以支撑精细化水环境管理。目前,虽然已有研究在黄河流域的部分支流开展了污染源排放清单的编制,但在清单构建过程中,包括污染源的分类分级体系、编制流程和方法的确定、清单时空精度的界定、数据库平台开发以及清单动态更新的流域水污染源排放清单构建体系尚未建

立。已有清单研究大部分基于省级或市级数据输入,时间尺度上多为年尺度排放清单,未能达到较高的时空精度。高分辨率污染排放清单是研究水污染成因的重要依据,对于水质提升方案的制定至关重要。未来应该在黄河流域针对全流域整体和重点子流域开展多尺度研究,基于统计数据的可得性,获取区域点面源排污总量,根据参数权重进行降尺度空间分配,考虑自然汇水单元与行政单元的嵌套与融合,构建多尺度高分辨率污染物排放清单,有助于为流域精细化水环境管理提供基础数据支撑。

2.3 黄河流域水环境模型模拟研究

流域断面水质状况是上游来水、支流汇水和流域内点面源等负荷污染的综合体现,流域水环境模型是对整个流域系统发生的复杂污染过程进行量化描述的有力工具^[39]。通过模拟污染物在流域范围内的迁移转化过程,建立污染源排放与断面水质的响应关系,可以揭示污染物迁移的时空分布规律^[40],量化污染源产生的污染负荷对收纳水体水质的贡献,为断面水质提升提供科学依据。

学者们在黄河流域水环境模拟方面开展了针对不同点面源污染的大量研究。张志杰等^[41]基于 DPcRS 模型,对黄河流域甘肃省境内面源污染进行核算与分析,明确了不同区域的污染贡献。Zheng 等^[42]采用 RSPROW 模型模拟黄河流域 2006—2017 年总氮和总磷通量时空变化,证明了气候变化对黄河流域养分负荷的重要影响。王军等^[43]以小浪底水库溶解氧含量为研究对象,构建了一种卷积神经网络 CNN 和长短时记忆网络 LSTM 结合的 CNN-LSTM 预测模型,比较准确地预测了小浪底水库的溶解氧含量。程静等^[44]利用 STELLA 模型对汾河流域非点源污染总氮负荷进行估算,预测总氮污染负荷到 2030 年将增长 6.83%。刘林等^[45]利用 AnnAGNPS 模型对灞河流域非点源污染特征进行定量分析,发现灞河总氮、总磷污染负荷在下游子流域远高于上游。邱瑀等^[46]基于 2012—2014 年水质数据,综合应用多元统计分析与一维水质模型 (Qual2Kw),系统分析了湟水河水水质时空变化及污染物来源,发现支流点源是氨氮的主要污染源,城镇生活污水和工业废水排放是总氮的主要污染源。王维刚等^[47]采用改进的 SWAT 模型构建了乌梁素海流域分布式水文水质模型,计算分析各管理情景下硝态氮与总磷负荷及对各作物产量的影响。王艳等^[48]采用考虑降雨和地形影响因子的输出系数模型,量化了河套灌区农田非点源总氮、总磷污染负荷以及入河量估算,并识别污染关键源区。

水环境模拟缺乏多尺度污染排放—断面水质响应关系研究。目前,黄河流域模型模拟研究主要集中在负荷量化与时空分布特征研究上,缺乏从污染源排放经过在水体中迁移转化到达超标断面的全过程响应关系的研究。黄河全流域的系统性模拟研究较少,对黄河整体的宏观决策支撑不足。针对断面水质达标目标,可以在黄河流域联合已建立的多尺度高分辨率排放清单,基于不同区域排放特征建立污染排放与断面水质响应模型,量化各控制单元不同污染源对流域污染浓度/通量的贡献,分析陆源点面源排放和重点支流输入对断面水质的影响。进一步解析主要污染物浓度/通量与流域人类活动、气候变化和自然因素的响应关系,明晰污染物浓度/通量变化主要驱动因子,为污染溯源和断面水质达标管理提供支撑。

3 结论与展望

a) 2018—2022年,黄河流域整体水质持续向好,水体达到良好状态。但干支流水质改善不同步,干流在2020年彻底消除GB 3838—2002 V类和劣V类水体,截至2022年,优于Ⅲ类水体的断面占86.6%,但部分支流近年来水质持续为劣V类,污染仍较为严重;主要污染指标总体呈下降趋势,季节性差异明显;污染空间差异较大,黄河中下游地区和部分支流污染严重。

b) 目前,黄河流域的水环境研究仍存在以下几个方面问题:黄河水质干支流差异显著,水沙变化大,缺少气候变化下的流域水环境承载力动态研究;现有排放清单分辨率不足,多为省级、市级以及年尺度排放清单,难以支撑流域精细化水环境管理;水环境模拟缺乏多尺度污染排放—断面水质响应关系研究,黄河全流域的系统性模拟研究较少,对黄河整体的宏观决策支撑不足。

c) 为了满足黄河流域断面水质达标的核心需求,建议在黄河流域开展“问题识别-成因诊断-对策方案”的链条式研究,解析水环境时空变化特征与区域差异,识别水污染优先控制区及重大水环境问题,开展气候变化下的流域水环境承载力动态研究,建立黄河流域动态高时空分辨率的污染源数据集,进一步构建污染排放与水质响应关系模型,揭示多尺度污染源排放—断面水质响应关系,从而提出流域水环境综合管控方案,为黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略提供支撑。

参考文献 (References):

[1] 王金南.黄河流域生态保护和高质量发展战略思考[J].环境保护,2020,48(增刊1):18-21.
WANG J N.Strategic thinking on ecological protection and high-

quality development in the Yellow River Basin[J].Environmental Protection,2020,48(Suppl 1):18-21.

- [2] 计伟,刘海江,高吉喜,等.黄河流域生态质量时空变化分析[J].环境科学研究,2021,34(7):1700-1709.
JI W,LIU H J,GAO J X,et al.Spatial-temporal variations of ecological quality in the Yellow River Basin[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(7):1700-1709.
- [3] 高欣,丁森,尚光霞,等.黄河流域水生态环境问题诊断与保护方略[J].环境保护,2021,49(13):9-12.
GAO X,DING S,SHANG G X,et al.Diagnosis and protection strategy of water ecological environment problems in the Yellow River Basin[J].Environmental Protection,2021,49(13):9-12.
- [4] 白璐,孙园园,赵学涛,等.黄河流域水污染排放特征及污染集聚格局分析[J].环境科学研究,2020,33(12):2683-2694.
BAI L,SUN Y Y,ZHAO X T,et al.Discharge characteristics and pollution aggregation pattern of water pollution in Yellow River Basin[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(12):2683-2694.
- [5] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].中国水利,2019(20):1-3.
XI J P.Speech at the symposium on ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J].China Water Resources,2019(20):1-3.
- [6] 李贵宝.《黄河保护法》内容剖析及创新特色[J].水利发展研究,2023,23(3):12-17.
LI G B.The details and characteristics of the *Yellow River Protection Law*[J].Water Resources Development Research,2023,23(3):12-17.
- [7] 陈静生,李荷碧,夏星辉,等.近30年来黄河水质变化趋势及原因分析[J].环境化学,2000,19(2):97-102.
CHEN J S,LI H B,XIA X H,et al.A study on water-quality trend in the Yellow River system from 1960's to 1990's[J].Environmental Chemistry,2000,19(2):97-102.
- [8] 孔祥春,陈吕平.黄河流域水环境现状及保护对策[J].人民黄河,1996,18(2):4-8.
KONG X C,CHEN L P.Present situation of water environment in the Yellow River Basin and its protection countermeasures[J].Yellow River,1996,18(2):4-8.
- [9] 孙占超.基于云模型的水环境质量评价研究:以黄河干流宁夏段为例[D].西安:长安大学,2017.
- [10] 杨学福,王蕾,关建玲,等.基于多元统计分析的渭河西咸段水质评价[J].环境工程学报,2016,10(3):1560-1565.
YANG X F,WANG L,GUAN J L,et al.Comprehensive assessment of water quality in Xi'an-Xianyang section of Weihe River based on multivariate analysis method[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2016,10(3):1560-1565.
- [11] 朱志鹏,司源,董飞,等.黄河流域水质时空变化特征与原因分析[J].水电能源科学,2023,41(3):39-43.
ZHU Z P,SI Y,DONG F,et al.Analysis of spatial-temporal variation characteristics and causes of water quality in the Yellow River Basin[J].Water Resources and Power,2023,41(3):39-43.

- [12] 王希欢,杨芳,马文娟,等.乌梁素海硝酸盐来源的季节性变化[J].环境科学研究,2021,34(5):1091-1098.
WANG X H,YANG F,MA W J,et al.Seasonal variation of nitrate sources in Wuliangsu Lake[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(5):1091-1098.
- [13] 郝晨林,巢世军,邓义祥,等.黄河流域(青海段)氮时空分布特征及其来源解析[J].环境科学研究,2023,36(2):325-333.
HAO C L,CHAO S J,DENG Y X,et al.Temporal and spatial distribution characteristics and source analysis of nitrogen in the Yellow River Basin in Qinghai Province[J].Research of Environmental Sciences,2023,36(2):325-333.
- [14] 张婷婷,张建,杨芳,等.温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响[J].环境科学,2012,33(4):1283-1287.
ZHANG T T,ZHANG J,YANG F,et al.Effect of temperature on pollutant removal and nitrous oxide emission of wastewater nitrogen removal system[J].Environmental Science,2012,33(4):1283-1287.
- [15] PERNET-COUDRIER B,QI W X,LIU H J,et al.Sources and pathways of nutrients in the semi-arid region of Beijing-Tianjin, China[J].Environmental Science & Technology,2012,46(10):5294-5301.
- [16] 张学青,夏星辉,杨志峰.黄河水体氨氮超标原因探讨[J].环境科学,2007,28(7):1435-1441.
ZHANG X Q,XIA X H,YANG Z F.Reasons of high concentration ammonium in Yellow River,China[J].Environmental Science,2007,28(7):1435-1441.
- [17] 刘彦龙,郑易安.黄河干流水质评价与时空变化分析[J].环境科学,2022,43(3):1332-1345.
LIU Y L,ZHENG Y A.Water quality assessment and spatial-temporal variation analysis in Yellow River Basin[J].Environmental Science,2022,43(3):1332-1345.
- [18] VAROL M,ŞEN B.Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques:a case study of Behrimaz Stream, Turkey[J].Environmental Monitoring and Assessment,2009,159(1):543-553.
- [19] 彭殿宝,周孝德.渭河流域(陕西段)水体现状及水污染综合治理研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(1):128-131.
PENG D B,ZHOU X D.Research on the water current situation and water pollution comprehensive treatment in Weihe River reach of Shaanxi Province[J].Journal of Water Resources and Water Engineering,2010,21(1):128-131.
- [20] 王玉,王雪蕾,张亚群,等.基于DPeRS模型的渭河典型断面汇水区面源污染评估及污染成因分析[J].环境监控与预警,2022,14(6):8-16.
WANG Y,WANG X L,ZHANG Y Q,et al.Estimation and pollution cause analysis on the typical basin of Weihe River based on DPeRS model[J].Environmental Monitoring and Forewarning,2022,14(6):8-16.
- [21] 董雯,王瑞琛,李怀恩,等.渭河西咸段水质时空变异特征分析[J].水力发电学报,2020,39(11):80-89.
DONG W,WANG R C,LI H E,et al.Spatiotemporal characteristics analysis of water pollutants in Xixian New Area in Weihe River Basin[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2020,39(11):80-89.
- [22] 刘鸿志,王光镇,马军,等.黄河流域水质和工业污染源研究[J].中国环境监测,2021,37(3):18-27.
LIU H Z,WANG G Z,MA J,et al.Water quality status and industrial pollution sources in the Yellow River Basin[J].Environmental Monitoring in China,2021,37(3):18-27.
- [23] ZHAO M M,WANG S M,CHEN Y P,et al.Pollution status of the Yellow River tributaries in middle and lower reaches[J].Science of the Total Environment,2020,722:137861.
- [24] 李皎,孙从建,陈伟,等.汾河下游地表水环境特征及污染源解析[J].地球环境学报,2022,13(4):380-392.
LI J,SUN C J,CHEN W,et al.Characteristics of surface water environment and source identification of water pollutants in the downstream of Fenhe River[J].Journal of Earth Environment,2022,13(4):380-392.
- [25] 汪恕诚.水环境承载能力分析 with 调控[J].水利发展研究,2002,2(1):2-6.
WANG S C.Analysis and regulation of water environment carrying capacity[J].Water Resources Development Research,2002,2(1):2-6.
- [26] 张旋.天津市水环境承载力的研究[D].天津:南开大学,2010.
- [27] 梁天祎.基于SWAT的伊洛河流域水环境承载力研究[D].郑州:华北水利水电大学,2021.
- [28] 白辉.基于水环境承载力的区域污染物总量控制方法研究及应用[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
- [29] 蒋晓辉,黄强,惠泱河,等.陕西关中地区水环境承载力研究[J].环境科学学报,2001,21(3):312-317.
JIANG X H,HUANG Q,HUI Y H,et al.Study on the models of bearing capacity of regional water environment[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2001,21(3):312-317.
- [30] 钱华.河流水库水环境承载力研究:以黄河万家寨水库为例[D].保定:华北电力大学(河北),2004.
- [31] 陈艳霞.渭河流域关中地区水环境承载力研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [32] 贾紫牧,陈岩,王慧慧,等.流域水环境承载力聚类分区方法研究:以湟水流域小峡桥断面为例[J].环境科学学报,2017,37(11):4383-4390.
JIA Z M,CHEN Y,WANG H H,et al.A study on the clustering zoning method for water environmental carrying capacity in the watershed scale:analysis exploring the upstream areas of Xiaoxia Bridge Section in Huangshui River Basin[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2017,37(11):4383-4390.
- [33] 张扬,付正辉,张雅然,等.气候变化情景下流域水环境承载力评估方法研究[J].北京大学学报(自然科学版),2023,59(2):242-250.
ZHANG Y,FU Z H,ZHANG Y R,et al.Evaluation method of watershed water environment carrying capacity under climate change scenarios[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2023,59(2):242-250.

- [34] 赵娜,万宝春,李巍,等.流域尺度水污染源清单高分辨率研究[J].环境生态学,2020,2(1):57-59.
ZHAO N,WAN B C,LI W,et al.High-resolution study of water pollutant source list at river basin scale[J].Environmental Ecology,2020,2(1):57-59.
- [35] 殷炳超,赵琰鑫.湟水流域水污染源排放清单及空间分析研究[J].环境保护科学,2022,48(4):68-73.
YIN B C,ZHAO Y X.Discharge list of water pollution source and spatial analysis in Huangshui River Basin[J].Environmental Protection Science,2022,48(4):68-73.
- [36] 翟元晓,崔胜辉,高兵,等.黄河流域农业生产活性氮排放的时空特征研究[J].环境科学学报,2021,41(7):2886-2895.
ZHAI Y X,CUI S H,GAO B,et al.Spatio-temporal characteristics of reactive nitrogen emission from agricultural production in the Yellow River Basin[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2021,41(7):2886-2895.
- [37] 陶园,徐静,任贺靖,等.黄河流域农业面源污染时空变化及因素分析[J].农业工程学报,2021,37(4):257-264.
TAO Y,XU J,REN H J,et al.Spatiotemporal evolution of agricultural non-point source pollution and its influencing factors in the Yellow River Basin[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(4):257-264.
- [38] 李雪迎,杨曦,乔琦,等.黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征[J].环境科学,2022,43(5):2459-2466.
LI X Y,YANG X,QIAO Q,et al.Emission characteristics of industrial water pollutants in Gansu section of the Yellow River Basin[J].Environmental Science,2022,43(5):2459-2466.
- [39] 蒋洪强,吴文俊,姚艳玲,等.耦合流域模型及在中国环境规划与管理中的应用进展[J].生态环境学报,2015,24(3):539-546.
JIANG H Q,WU W J,YAO Y L,et al.Coupling watershed environmental model with optimizing method to provide least cost alternatives in environmental planning and management[J].Ecology and Environmental Sciences,2015,24(3):539-546.
- [40] 朱瑶,梁志伟,李伟,等.流域水环境污染模型及其应用研究综述[J].应用生态学报,2013,24(10):3012-3018.
ZHU Y,LIANG Z W,LI W,et al.Watershed water environment pollution models and their applications:a review[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(10):3012-3018.
- [41] 张志杰,温飞,张亚群,等.区域尺度黄河流域面源污染负荷特征与来源解析[J].环境工程,2022,40(9):81-88.
ZHANG Z J,WEN F,ZHANG Y Q,et al.Characteristics and source analysis of non-point source pollution load in the Yellow River Basin on a regional scale[J].Environmental Engineering,2022,40(9):81-88.
- [42] ZHENG J Q,CAO X H,MA C Z,et al.What drives the change of nitrogen and phosphorus loads in the Yellow River Basin during 2006-2017?[J].Journal of Environmental Sciences,2023,126:17-28.
- [43] 王军,高梓勋,朱永明.基于 CNN-LSTM 模型的黄河水质预测研究[J].人民黄河,2021,43(5):96-99.
WANG J,GAO Z X,ZHU Y M.Research on Yellow River water quality prediction based on CNN-LSTM model[J].Yellow River,2021,43(5):96-99.
- [44] 程静,贾天下,欧阳威.基于 STELLA 和输出系数法的流域非点源负荷预测及污染控制措施[J].水资源保护,2017,33(3):74-81.
CHENG J,JIA T X,OUYANG W.Prediction of non-point source load based on STELLA and export coefficient method and prevention measures[J].Water Resources Protection,2017,33(3):74-81.
- [45] 刘林,李金峰,李泽利,等.汾河上游流域 SWAT 模型构建及适用性评价[J].人民黄河,2020,42(11):58-62.
LIU L,LI J F,LI Z L,et al.Construction of SWAT model and its applicability evaluation in upper basin of Fenhe River[J].Yellow River,2020,42(11):58-62.
- [46] 邱瑀,卢诚,徐泽,等.湟水河流域水质时空变化特征及其污染源解析[J].环境科学学报,2017,37(8):2829-2837.
QIU Y,LU C,XU Z,et al.Spatio-temporal variation characteristics and water pollution sources in the Huangshui River Basin[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2017,37(8):2829-2837.
- [47] 王维刚,史海滨,李仙岳,等.基于改进 SWAT 模型的灌溉-施肥-耕作对乌梁素海流域营养物负荷及作物产量的影响[J].湖泊科学,2022,34(5):1505-1523.
WANG W G,SHI H B,LI X Y,et al.Effects of irrigation-fertilization-tillage on nutrient loading and crop yield in Ulansuhai watershed based on improved SWAT model[J].Journal of Lake Sciences,2022,34(5):1505-1523.
- [48] 王艳,焦燕,杨文柱,等.基于改进输出系数模型的河套灌区农田非点源氮磷污染估算[J].中国环境科学,2023:1-11.
WANG Y,JIAO Y,YANG W Z,et al.Estimation of farmland non-point source nitrogen and phosphorus pollution in the Hetao irrigation district based on improved export coefficient model[J].China Environmental Science,2023:1-11.

(责任编辑:刘 方)